

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14141

研究課題名（和文）直流ヒューズの高遮断容量化に向けた高分子と珪砂を併用したアーク限流遮断方式の開発

研究課題名（英文）Development of DC arc interruption method using polymer and silica sand for high interrupting capacity of DC fuses

研究代表者

児玉 直人（Kodama, Naoto）

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：80828971

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、直流回路を保護する素子である限流ヒューズ内で発生するアーク放電の新しい限流遮断方式を検討した。光硬化性樹脂で作成した狭隘部付き模擬ヒューズを設計し、アーク放電の消弧に対して利用した。その結果、従来から限流ヒューズの消弧媒体として用いられてきた珪砂と比較して、本遮断方式を用いることでアーク消弧過程におけるアーク抵抗の上昇、ひいてはアーク消弧時間の短縮化に成功した。本方式においてアーク抵抗が上昇した要因を、アークのガス特性のシミュレーションから検討した。その結果、高分子蒸気がアークに混入することで、アークの電気抵抗率や熱散逸性が上昇し、その結果としてアーク抵抗が上昇したことが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果、数十年間、限流ヒューズのアーク消弧媒体として用いられてきた珪砂に加えて、高分子材で作成した狭隘部とアークの物理的な接触および溶発によるアークの物性の変化を利用することで、限流ヒューズのアーク遮断容量の更なる高容量化が見込めることが判明した。本成果は、再生可能エネルギーの導入において必須となる直流系統の実現と保護に対して資する成果となっている。

研究成果の概要（英文）：The present study investigated a new current-limiting interrupting method for arc discharges formed in current-limiting fuses. A simulated fuse with a narrow part made of light-curing resin was designed and used for quenching of the arc discharges. As a result of the experiment, compared to silica sand which has been conventionally used as an arc quenching medium for current-limiting fuses, the new method successfully increased arc resistance during the arc quenching process and shortened the arc quenching time. The reason for the increase in arc resistance in this method was examined by simulating the gas characteristics of the arc. As a result, it was found that the electrical resistivity and heat dissipation of the arc increased due to the polymer vapor mixing into the arc, and as a result, the arc resistance increased.

研究分野：電力機器

キーワード：アーク ヒューズ 消弧媒体 熱プラズマ

1. 研究開始当初の背景

電力系統における再生可能エネルギー発電の導入や蓄電池を動力源とする電気自動車の普及に伴い、直流(DC)系統・回路の保護技術の向上が強く望まれている。DCヒューズはコスト・重量・大きさに比した高い遮断容量を有している。一方で、電気自動車の車載電源の高電圧化や、高電圧直流系統の実現のために、DCヒューズの更なる高遮断容量化が課題の一つとなっている。これまでのDCヒューズの高遮断容量化に関しては、通電部であるエレメントの形状設計の最適化に関する研究が多く行われてきた。一方で、ヒューズ内部で発生するアーク放電を証拠させるための「アーク消弧媒体・消弧方法」に関する研究報告例は少ない。従って、DCヒューズの「アーク放電の消弧能力」を向上させることが可能な新たな消弧媒体・消弧方法を開発する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、DCヒューズにおけるアーク消弧媒体として従来から用いられてきた珪砂に加えて、「高分子材の溶発現象」を効果的に用いることで、アーク放電の迅速な消弧が可能な新たな限流遮断方式を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

アーク放電を迅速に遮断するためには、アーク放電の電気抵抗を速やかに向上させる必要がある。アーク放電の抵抗を向上させる方法としては、(1)アーク放電と消弧材の物理的な接触による電流路の収縮、(2)消弧材の蒸発に伴い起こるアーク放電の温度低下に起因する電気抵抗率の上昇、(3)消弧材蒸発のアーク放電への混入による電気抵抗率の上昇、が考えられる。本研究では、これらを全て達成可能な方法として、「エレメント周囲に高分子材製の狭隘部を配置することで、狭隘部とアークの接触によりアークの電流路を収縮、高分子の溶発によりアークの温度低下や電気抵抗率上昇を誘発させる新たな方法」を検討した。

上記の内容を、主として以下の①～③の方法を用いて研究を進めた。

① 3Dプリンタを用いた高分子製狭隘部の作成と直流遮断実験

エレメントの周囲に配置する狭隘部の形状を検討するために、任意の3次元形状を容易に作成可能な3Dプリンタを用いて、様々な形状の高分子製狭隘部を作成した。作成した高分子製狭隘部を用いて、4.に示す直流遮断実験を行った。実験の結果から、高分子製狭隘部の形状とアーク抵抗の上昇の関係を検討した。また、アーク遮断後の高分子製狭隘部の形状から、遮断過程における高分子材の溶発について検討した。

② 遮断過程のアーク放電の高温ガス組成・特性に対するシミュレーション

実験において用いた高分子材や珪砂が溶発して銅(Cu)アークに混入した場合を想定して、Cu/SiO₂/polymerの3成分系に対する高温ガス組成や高温ガス特性(電気抵抗率、熱拡散率など)のシミュレーションを行った。計算により得られた高温ガスの組成・特性と、実験から得られたアーク抵抗の変化から、本研究におけるアークの限流遮断能力について考察をした。

③ 絶縁抵抗計測や透過X線計測によるアーク遮断後の電気絶縁性能の評価

一般的にDCヒューズでは、アーク消弧後(=電流遮断後)に回路の絶縁状態を保つ役割も有する。そのため、本研究においても、アーク遮断後の模擬ヒューズに対して絶縁抵抗計を用いた絶縁抵抗計測を行い、アーク遮断後の電気絶縁の可否について検討した。また、遮断後の模擬ヒューズに対して透過X線計測を行い、遮断後の模擬ヒューズ内部の様相を観測した。

4. 研究成果

① 3Dプリンタを用いた高分子製狭隘部の作成と直流遮断実験の結果

3Dプリンタ(Formlabs, Form2)を用いて光硬化性樹脂製の狭隘部円筒を作成した。この円筒と通電部銅エレメントを用いて図1に示す模擬ヒューズを作成した。この模擬ヒューズでは、円筒内に設置された銅エレメントの中央部(アーク点弧点)の付近に高分子性の狭隘部(幅: w_p)が設けられている。また、円筒内には珪砂(SiO₂)が充填されている。この構造は、以下の3点を意図している：①狭隘部間でアークが生じることによるアーク電流路の収縮、②アークの高温(5000-30000 K)によって高分子性

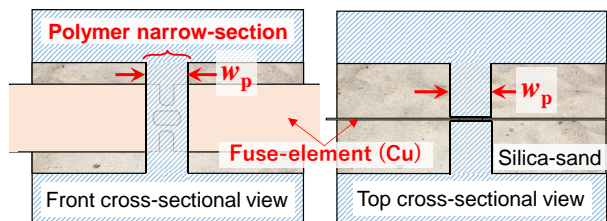


図1 遮断実験に使用した高分子円筒設置型
模擬ヒューズ

狭隘部が溶発し、溶発によって生じたポリマー蒸気がアークに作用することによるアークの冷却、③ ポリマー溶発蒸気のアークへの混入によるアーク電気抵抗率の上昇・アークからの熱散逸性の上昇。上記の模擬ヒューズを大電流発生回路に接続し、1000 A の DC 減衰電流を通电することで、DC アーク遮断実験を行った。

実験の結果、図 2(a)に示すように、ヒューズ内部のエレメント周囲に対して高分子製狭隘部を設け、その幅 w_p を長くすることで、限流速度の向上、および遮断時間の短縮に成功した。

このときのアーク抵抗 r_{arc} は、図 2(b)に示すように、 w_p が長くなるほど r_{arc} が大きくなった。狭隘部幅 w_p を設けることによる r_{arc} 上昇は、低電流域において特に顕著であった。例えば、瞬時電流 $i=700$ A において r_{arc} は、 w_p によらず 1Ω 程度であった。一方で、 $i=50$ A における r_{arc} は $w_p=0.0$ mm で約 4Ω 、 2.7 mm で約 6Ω 、 4.5 mm で約 8Ω であり、小電流域において特に r_{arc} が上昇する結果となった。

大電流域において r_{arc} の増加がわずかだった理由としては、アーク電流路の狭域化に伴い電流密度が増加した結果、アークの温度が増加し、電気抵抗率が低下したことが考えられる。

小電流域で r_{arc} が特に増加した原因としては、②で述べるように、アークに対してポリマーの蒸気が混入することで、アークの電気抵抗率や熱散逸性が上昇したことが考えられる。

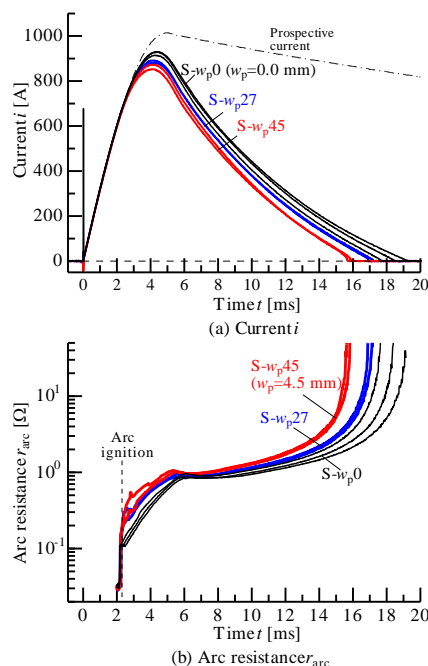


図 2 アーク遮断実験の結果

② 遮断過程のアーク放電の高温ガス組成・特性に対するシミュレーションの結果

実験結果の解析のために、光硬化性樹脂の蒸気が混入したヒューズ内部アークの高温ガス組成およびガス特性を理論計算した。光硬化性樹脂の詳細な成分は未公開だったため、樹脂材の光透過特性、質量密度および一般的な化学構造から実験に用いた光硬化性樹脂の組成を仮定し、計算に用いた。

ガス特性計算の結果、温度が $25000-5000$ K の広い温度領域において、イオンよりも中性原子が支配的なガス組成となっていることが分かった。中性原子としては、H、C、O が主たる化学種であった。イオンよりも中性原子が主たる化学種であった原因としては、H、C、O の電離電圧が非常に高いことが考えられる。また、温度 5000 K 程度の領域では、C が結合することで C_3 が生成されていた。

ガス特性計算については、特に、電気抵抗率や熱拡散率を計算した。計算の結果、図 3(a)に示すように、ヒューズ内部アークに対してポリマー蒸気が混入することで、温度 15000 K 以下における電気抵抗率が顕著に増加することが分かった。また、ポリマー蒸気が混入することで、図 3(b)に示すように、熱拡散率も上昇している。

従って、①の実験における r_{arc} 上昇に対する解釈として、(a) ポリマー蒸気混入によって、ある温度における電気抵抗率が上昇した影響、および(b) ポリマー蒸気混入によってアークの熱散逸が上昇し、温度が低下しやすくなった結果として電気抵抗率が上昇した影響、の2つが考えられる。

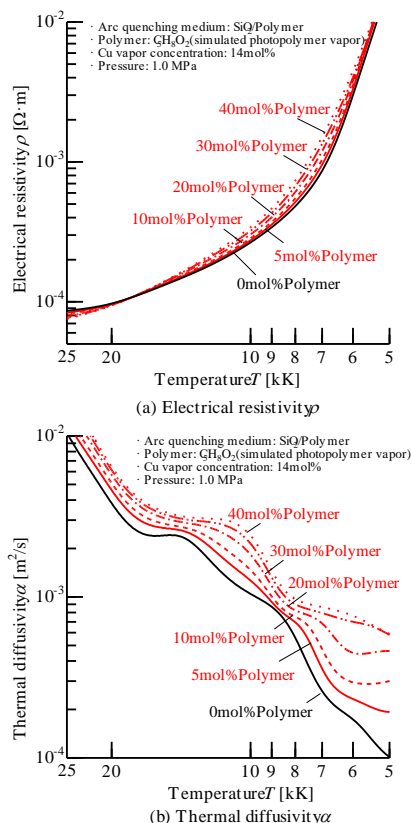


図 3 光硬化性樹脂の蒸気が混入したヒューズ内部アークのガス特性

③ 絶縁抵抗計測や透過 X 線計測によるアーク遮断後の電気絶縁性能の評価の結果

アーク遮断後の絶縁抵抗を測定した結果、 $w_p=0.0-2.7$ mm では絶縁抵抗が $0.01 \sim 0.02$ M Ω 程度の非常に小さな絶縁抵抗だった。これに対して、 $w_p=4.5$ mm では絶縁抵抗が $10 \sim 100$ M Ω 程度まで上昇した。

また、遮断後の模擬ヒューズに対して透過 X 線計測を行い、アーク遮断後の模擬ヒューズ内部の狭隘部付近の様相を観察した。その結果、アーク遮断過程で狭隘部は溶発し、ヒューズ内部で解け残ったエレメント間には空隙が生成されていることがわかった。この空隙幅は、 w_p の増加に依存して広がった。

従って、高分子製狭隘部の設置における絶縁抵抗の変化について以下が考えられる。アーク遮断過程で高分子製の狭隘部が溶発することで、解け残ったエレメントの間に空隙が生成される。このとき、高分子蒸気が混入したアークの温度の低下にともない C_3 などの炭素を多く含んだ化学種が生成される。この気体が温度低下することで、黒鉛のような導電性物質が生成されると考えられる。アーク消弧後の空隙距離が短い場合、この導電性物質が空隙間に満たされることで絶縁抵抗が低下してしまうと考えられる。一方で、空隙距離が十分に長い場合、空隙間が導電性物質で満たされにくくなり、絶縁抵抗が上昇すると考えられる。

以上の結果から、ヒューズ内部のエレメントの周囲に高分子製の狭隘部を設置し、その幅を適切に設定することで、DC ヒューズのアーク消弧能力の向上が可能なことが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kodama Naoto, Yokomizu Yasunobu, Takenaka Waku, Iwata Mikimasa, Danish M. S. S.	4. 巻 18
2. 論文標題 DC Arc Quenching Using Ablation of Polymer Narrow Section Arranged around Fuse Element	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1837 ~ 1844
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.23911	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 兒玉直人, 横水康伸, 竹中湧, 中村哉太, 岩田幹正, M.S.S. Danish
2. 発表標題 ヒューズエレメント周囲に配置した高分子材の溶飛を用いたDCアーク消弧実験
3. 学会等名 令和4年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoto Kodama, Yasunobu Yokomizu, Waku Takenaka, Kanata Nakamura, Shinsuke Tozaki, Mikimasa Iwata, and M. S. S. Danish
2. 発表標題 Experiment on DC Arc Quenching using Ablation of Polymer Narrow-Section Arranged around Fuse-Element
3. 学会等名 International Workshop on High Voltage Engineering 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 兒玉直人, 横水康伸, 中村晃也, 竹中湧, 清水 宏紀
2. 発表標題 珪砂を用いた直流アーク消弧過程で生じる高温ガスの特性
3. 学会等名 放電・プラズマ・パルスパワー/開閉保護/高電圧合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoto Kodama, Yasunobu Yokomizu, and Waku Takenaka
2. 発表標題 DC Arc Interruption Experiment using Arrangement of Polymer-Narrow Section inside Fuse-Case Filled with Silica-Sand
3. 学会等名 ICEPE-ST 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 兒玉 直人, 中村哉太, 横水康伸, 竹中湧, 岩田幹正
2. 発表標題 限流ヒューズ内で生成される高温Cu/SiO ₂ 混合蒸気の臨界換算電界
3. 学会等名 令和5年 電気学会 電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 兒玉 直人, 中村哉太, 横水康伸, 竹中湧, 岩田幹正
2. 発表標題 ヒューズ内発生する高温Cu/SiO ₂ 混合ガスに対する臨界換算電界の決定要因ー温度3000-5000 Kー
3. 学会等名 電気学会 放電・プラズマ・パルスパワー/開閉保護/高電圧合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoto Kodama
2. 発表標題 Development of Electrical Circuit Protection Device Based on Gas Properties Analysis of High-Temperature Arc and Hot Gas
3. 学会等名 ISPlasma2024/IC-PLANTS2024/APSPT13 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------